

无损检测技术在运营地铁隧道结构病害检测中的应用

陶学红¹, 赵少鹏², 刘军²

(1. 杭州杭港地铁有限公司, 浙江 杭州 310021; 2. 杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 地铁是城市公共交通的重要组成部分。随着我国各大城市地铁的快速发展, 需要快速准确地对长程隧道结构病害进行检测以确保地铁安全运营。本文介绍了一种基于裂缝综合检测仪和探地雷达系统的无损检测技术, 对地铁隧道管片结构的裂缝宽度和深度进行检测, 并探测其内部结构损伤情况。实际工程案例分析结果表明, 与传统检测方式相比, 无损检测技术具有检测速度快、检测准确度高、无需破坏结构本体等优点, 能有效保障地铁隧道的结构安全和运营安全。

关键词: 无损检测技术; 地铁隧道; 结构裂缝; 探伤检测; 探地雷达

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0126-05

Application of nondestructive testing technology in the disease detection of subway tunnel structure

TAO Xue-hong¹, ZHAO Shao-peng², LIU Jun²

(1. Hangzhou Hanggang Metro Co., Ltd., Hangzhou 310021, Zhejiang, China;

2. Hangzhou Geotechnical Engineering and Surveying Research Institute with Limited Liability, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: Subway network is a key component of the public transportation system. Along with rapid development of subways in major cities of China, it becomes increasingly important to perform quick and accurate disease detection for long-distance tunnels to ensure the safe operation of subway. In this paper, a nondestructive testing (NDT) technology based on comprehensive crack detector and geological radar system is introduced to detect the crack width and depth of the tube segment structure of the tunnel, and the damage of its internal structure. According to the engineering case analyses, the testing results show that compared with the traditional testing methods, NDT technology has the advantages of fast detection speed, high detection accuracy and no need to destroy the structure itself, which can effectively ensure the safety of tunnel structure and operation.

Key words: nondestructive testing technology; subway tunnel; structural cracks; flaw detection; ground penetrating radar

0 引言

地铁在国内各大城市迅速建设发展, 截至 2022 年 10 月, 全国地铁开通运营总里程已达 9 246 km, 其中运营里程超 100 km 的城市有 24 个, 地铁已经成为城市居民出行的主要交通工具。隧道结构病害是影响地铁运营安全的重要问题^[1-2], 如无法快速准确掌握隧道结构病害情况, 并对病害进行有效的整治处理, 将对地铁的运营及结构安全产生较大的威胁。

过去主要以人工检测的方式获取隧道结构病害的信息, 但是其检测效率低、信息反馈周期长、检测结果实际误差较大等缺陷已无法满足超长运营里程隧道的病害检测需求, 不利于及时消除危及地铁结构及运营安全的重大隐患^[3-4]。

本文介绍了一种基于无损检测技术的新型隧道结构病害检测方法, 通过使用裂缝综合检测仪测量隧道结构裂缝的宽度和深度, 并采用探地雷达系统对结构内部损伤情况进行探测, 检测结果作为评估地铁隧道结构状态安全等级和病害整治的依据。

1 无损检测技术

无损检测技术是指在不影响结构受力性能、使用功能的前提下, 直接在隧道管片结构表面通过测定某些物理量, 推定管片结构的强度、均匀性、连续性、耐久性等性能的检测方法, 本文介绍的无损检测技术主要使用的检测设备包括裂缝综合检测仪和探地雷达系统, 以实现无需破坏管片结构本体, 即可快速准确地检测出管片结构裂缝的宽度和深度以及结构体内部空洞、开裂、不均匀性等损伤情况。

1.1 裂缝综合检测仪

(1) 裂缝宽度检测

在利用裂缝综合检测仪对裂缝深度进行测量时, 通过在待测裂缝上放置的摄像头获取的清晰图像, 仪器即可自动识别出裂缝的轮廓, 从而能够自动测量获取裂缝的宽度值。也可根据当前帧图片, 进行手动判读裂缝宽度。裂缝宽度检测示意图如图 1 所示。

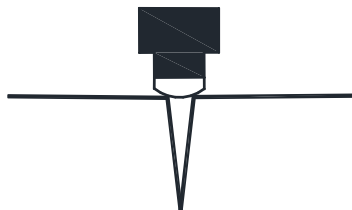


图 1 裂缝宽度检测示意图

Fig. 1 Schematic of crack width detection

(2) 裂缝深度检测

在对裂缝深度进行检测时, 仪器可根据声波绕射原理进行裂缝深度测量, 测量裂缝深度时先进行不跨缝测试, 分别在 3 个位置测出声速, 之后在跨缝测试中测试出 3 个位置声速。裂缝深度检测过程中, 超声波在存在裂缝的混凝土内部传播时, 会在裂缝的端点产生衍射现象, 从而可以根据超声波衍射的角度和裂缝深度之间的几何关系计算得到裂缝深度。

单面平测法可用于只有 1 个可测表面且深度小于 500 mm 的裂缝深度测量^[5-8]。当采用单面平测法测量裂缝深度时, 应当采用不同的测距以跨缝和不跨缝 2 种方式分别布点测量待测裂缝的深度, 其测量步骤应为:

a) 不跨缝的声时测量: 通过在待测裂缝的同一侧放置 T 和 R 换能器, 并使 T 和 R 换能器的内边缘间距 (l') 分别等于 100、150、200、250 mm 等

间距, 读取对应的声时值 t_i 并绘制成“时-距”坐标图, 见图 2, 或者可以通过线性回归分析的方法得到声时和声速之间的线性回归方程:

$$l' = a + bt \tag{1}$$

式中: l' 为换能器内边缘间距的测距值, mm; t 为与 l' 对应的声时值, μs ; a 为常数项, mm; b 为回归系数即平测法声速 v , km/s。第 i 点的换能器中心间距测距值 l_i 与内边缘间距测距值 l'_i 关系式为:

$$l_i = l'_i + |a| \tag{2}$$

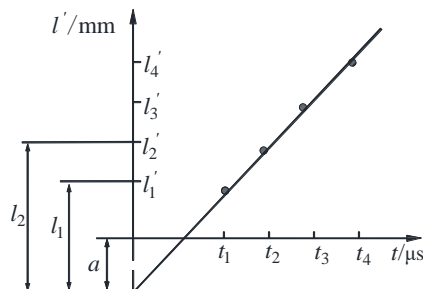


图 2 “时-距”关系图

Fig. 2 Time-distance relationship

采用不跨缝平测时, 声速值 v 由下式表示:

$$v = (l'_n - l'_1) / (t_n - t_1) \tag{3}$$

式中: l'_n 表示第 n 点的距离观测值, mm; l'_1 表示第 1 点的距离观测值, mm; t_n 表示第 n 点的声时值, μs ; t_1 表示第 1 点的声时值, μs 。

平测时, 为了确保测距的精准度, 需要以换能器的内边缘为准进行测距, 同时, 为了有效地剔除仪器初始读数和声波传播路径误差对声波传播距离测量结果的影响, 计算声波传播距离时可以采用“时-距”法。

b) 跨缝的声时测量: 如图 3 所示, 以裂缝待测部位为轴心, 将 T、R 换能器放置在裂缝两侧对称位置, 并使 T、R 换能器的内边缘间距分别等于 100、150、200 mm 等距离, 读取对应的声时值 t_i^0 。读取的声时值 t_i^0 即为脉冲波在绕过裂缝底部传播所用的时间。

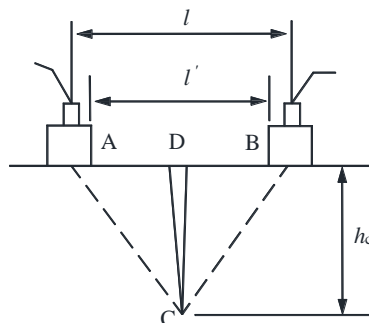


图 3 跨缝测量示意图

Fig. 3 Schematic of transcrack measurement

采用平测法进行裂缝深度检测时,裂缝底部的深度值 h_{ci} 可以根据式(4)来计算:

$$h_{ci} = \frac{l_i}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{t_i^0 v}{l_i}\right)^2 - 1} \quad (4)$$

$$m_{hc} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{ci} \quad (5)$$

式(4)中: l_i 为第*i*点的换能器中心间距测距值,mm; v 为声速值, μs 。式(5)中: m_{hc} 为在各测点上采用平测法测量计算得出的裂缝深度的平均值。需要注意的是,当发现某个测距存在首波反相,则可以使用该测距和相邻的2个测距值分别根据式(4)计算得到裂缝深度值 h_{ci} ,然后将计算得到的3个裂缝深度值 h_{ci} 取平均值作为该裂缝的深度值 h_c 。若所有测距均未发现首波反相,那么可以根据不同的测距按照式(4)和式(5)分别计算得到裂缝深度值 h_{ci} 和裂缝深度值的平均值 m_{hc} 。通过将各测距值 l_i' 与裂缝深度值的平均值 m_{hc} 进行对比,将 $l_i' < m_{hc}$ 和 $l_i' > 3m_{hc}$ 的数据剔除,该裂缝的深度值 h_c 可以用剩下的裂缝深度值 h_{ci} 的平均值来表示。

1.2 探地雷达系统

本次隧道管片结构内部损伤情况采用探地雷达系统进行检测。探地雷达系统工作时,通过发射天线将高频电磁波以脉冲的形式定向送入地下。高频电磁波在地下介质的传播过程中,当地下介质电性发生变化时,高频电磁波发生反射并返回至地面后,由接收天线接收^[9-10]。系统会对接收到的雷达波进行分析处理,并根据雷达波的特性,即可将地下目标体的性质和状态确定出来。图4为探地雷达系统的工作原理。

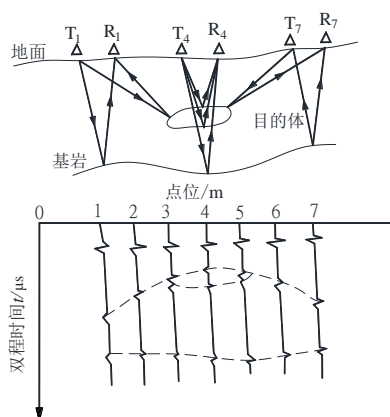


图4 探地雷达系统工作原理

Fig. 4 Working principles of ground penetrating radar system

雷达所检测的介质结构内部通常含有多个界面,雷达波由介质表面向内部进行传播时,被称为下行波,经反射回表面的波称为上行波。每当经过

不同的界面时,下行波就会因为发生了反射和折射,能量被一分为二,一部分能量由于折射的作用,朝介质内部继续进行传播,另一部分能量由于反射的作用,由下行波转为上行波,方向由介质内部向外部进行传播。反射或折射的系数越大,分配的能量就越高。当上一个界面的入射波经折射作用继续向介质内部传播的一部分雷达波遇到下一个界面时,则变为下一个界面的入射波,因此,每经过一个界面,下行波的能量就会逐渐减少。介质中上下行波的运行都是相互独立的,遇到界面时,都会遵循 snell 定律发生折射和反射。因此,雷达波在存在多个界面的介质中进行传播时,会产生无数个反射波和折射波,只是随着反射和折射次数越来越多,能量越来越少。

2 工程概况

2.1 项目概况

拟建项目位于地铁 50 m 保护区范围内,须在地铁保护区内进行桩基围护及基坑开挖等对周围土体扰动较大的施工,地铁隧道受影响里程范围为上行线 K17+350~K17+515,下行线 K17+380~K17+515,项目基坑距离既有地铁下行隧道结构最近约 13.5 m,距离上行隧道结构最近约 27 m。为评估项目施工影响范围内既有地铁隧道结构状态和安全等级,并根据隧道结构安全等级制定项目地铁保护施工方案和监测方案,故在项目施工前,需要对既有地铁隧道管片结构裂缝进行检测,并对存在裂缝的管片内部损伤情况进行探查。

2.2 隧道结构状况

外部项目影响区域内地铁盾构隧道内径为 5.5 m,隧道衬砌采用标准环宽为 1.2 m,厚度为 0.35 m 的装配式预制钢筋混凝土管片,混凝土强度等级为 C50,抗渗等级为 P10。拼装时,每环管片共由 6 块组成,采用 3 块标准块+2 块邻接块+1 块封顶块进行错缝拼接,环与环之间,块与块之间通过弯螺栓进行连接,密切贴合。每环管片相邻拼接块之间由 2 个螺栓进行连接,相邻两环管片间由 16 个螺栓进行连接,其中封顶块设置 1 个螺栓,标准块和邻接块各设置 3 个螺栓。

3 检测流程

通过人工现场对检测范围内的管片逐环进行检查,当发现存在裂缝时,首先使用裂缝综合检测

仪测量裂缝宽度和深度, 并记录裂缝编号及所处管片位置见图 5。随后采用探地雷达系统对裂缝周围管片结构内部损伤情况进行检测, 本次地铁隧道结构探伤检测采用方法为剖面法, 即通过将探地雷达系统的发射天线和接收天线顺着事先规划好的测线方向同时进行移动, 即可获得管片结构内部的介质形态。测线应布设在被测裂缝两侧, 距离裂缝 10~20 cm 的对称位置, 布设方向应与被测裂缝的走向一致, 同时, 布设长度应与被测裂缝的长度相同, 沿测线设置的采样点间距为 5 cm。现场采集完成后, 通过对探地雷达系统扫描获取的图像进行处理, 即可绘制得到雷达时间剖面图。



图 5 结构病害检测图

Fig. 5 Structural disease detection

4 结果分析

通过对该运营地铁隧道检测范围内管片逐环进行检查确认, 发现上行隧道 116 环及下行隧道 189 环、198 环、200 环、208 环、210 环管片结构存在裂缝病害, 现场通过裂缝综合检测仪探明了各条管片结构裂缝的长度、宽度及深度情况, 并使用探地雷达系统对裂缝处管片结构内部损伤情况进行了探测。探测结果如表 1 所示:

表 1 隧道结构病害检测结果汇总表

Table 1 Tunnel structure disease detection results

环号	裂缝编号	裂缝长度/cm	裂缝宽度/mm	裂缝深度/mm	渗漏水及破损情况
上行 116	116-1	50	0.27	36	无
	116-2	40	0.27	23	无
189	189-1	63	0.67	48	无
198	198-1	21	0.21	—	有脱空
下行 200	200-1	45	0.21	29	无
	208	208-1	23	0.58	无
	210	210-1	74	0.65	有脱空

根据检测结果显示:

(1) 上行 116 环管片存在 2 处结构裂缝, 第 1 处裂缝长 50 cm, 宽 0.27 mm, 深 36 mm, 探地雷达系统检测结果显示管片结构内部无明显破损情况; 第 2 处裂缝长 40 cm, 宽 0.27 mm, 深 23 mm, 探地雷达检测结果表明, 管片结构内部雷达反射信号无明显绕射现象, 内部结构无明显破损。

(2) 下行 189 环管片存在 1 处结构裂缝, 裂缝长 63 cm, 宽 0.67 mm, 深 48 mm; 198 环管片存在 1 处结构裂缝, 裂缝长 21 cm, 宽 0.21 mm; 200 环管片存在 1 处结构裂缝, 裂缝长 45 cm, 宽 0.21 mm, 深 29 mm; 208 环管片存在 1 处结构裂缝, 裂缝长 23 cm, 宽 0.58 mm, 深 37 mm; 210 环管片存在 1 处结构裂缝, 裂缝长 74 cm, 宽 0.65 mm。探地雷达检测结果表明, 198 环和 210 环管片结构裂缝区域内部雷达反射信号存在绕射现象, 结合现场人工识别, 确认该位置存在结构脱空情况, 其余管片结构内部无明显破损情况。198 环和 210 环雷达探测剖面及现场照片见图 6~7。

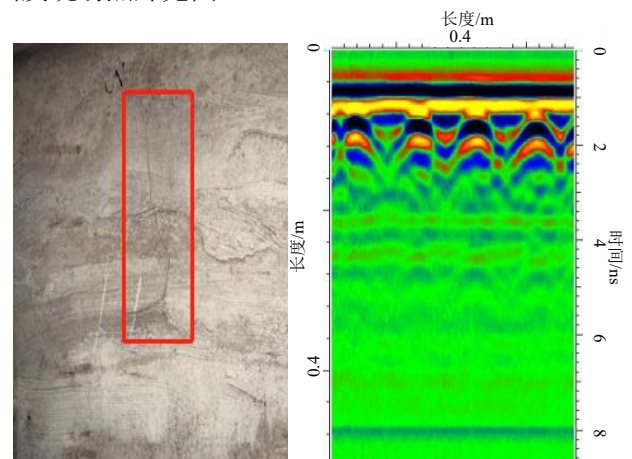


图 6 198 环管片裂缝现场照片及雷达探测剖面图

Fig. 6 Crack of the 198th segment and radar detection result

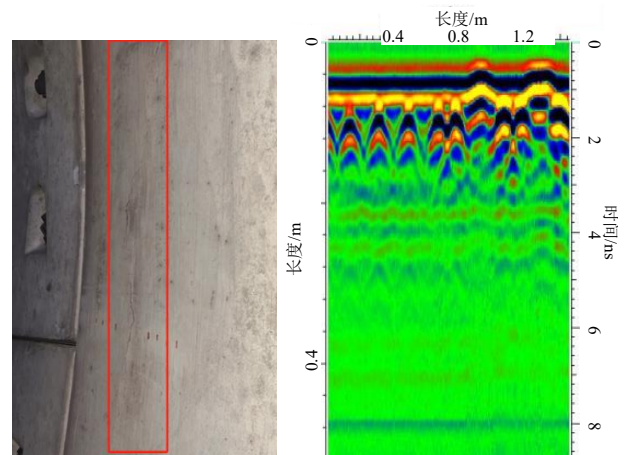


图 7 210 环管片裂缝现场照片及雷达探测剖面图

Fig. 7 Crack of the 210th segment and radar detection result

5 结论

针对传统检测手段无法准确检测隧道管片结构裂缝深度、无法有效探明管片结构内部损伤的情况,同时,针对运营地铁隧道施工检修天窗期时间短的问题,本文介绍了一种由裂缝综合检测仪和探地雷达系统组成的无损快速检测技术,并将其应用于实际工程案例中,检测结果表明:

(1) 该无损检测技术具有检测速度快的优点,3个小时即完成了项目影响范围内250环管片的结构病害检测工作,大大提高了运营地铁隧道结构病害的检测效率。

(2) 通过该无损检测技术能够精确获取管片结构裂缝的宽度和深度值。同时,在不破坏隧道结构的情况下,能够准确探明管片结构内部的损伤情况,方便运营维保单位及时准确地掌握地铁隧道结构的状况。

综上所述,无损检测技术作为一种新型技术已经在运营地铁隧道结构病害检测中发挥着重要的作用,便于地铁运营维保单位快速准确地鉴定隧道结构的病害状况,根据结构病害的发展情况,及时对隧道结构病害进行有效处理,保障地铁结构及运营安全。

参考文献

- [1] 叶耀东,朱合华,王如路.软土地铁运营隧道病害现状及成因分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(1):157-160,166.
YE Yao-dong, ZHU He-hua, WANG Ru-lu. Analysis on the current status of metro operating tunnel damage in soft ground and its causes[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 157-160, 166.
- [2] 罗鑫,夏才初.隧道病害分级的现状及问题[J].地下空间与工程学报,2006,2(5):877-880.
LUO Xin, XIA Cai-chu. Current situation and problems of classification of tunnel diseases[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(5): 877-880.
- [3] 吴江滨,张顶立,王梦恕.铁路运营隧道病害现状及检测评估[J].中国安全科学学报,2003,13(6):49-52.
WU Jiang-bin, ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu. Current damage situation of railway operation tunnels and their inspection and evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(6): 49-52.
- [4] 杨玲芝,方恩权.轨道交通隧道结构病害检测技术综述与发展趋势[J].都市轨道交通,2017,30(1):20-25,76.
YANG Ling-zhi, FANG En-quan. Review and developing trend on technology for detecting metro tunnel structure diseases[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(1): 20-25, 76.
- [5] 轩俭良,轩宁.隧道衬砌裂缝检测与分析研究[J].公路,2015,60(6):263-267.
XUAN Jian-liang, XUAN Ning. Study of the detection and analysis of tunnel lining structure[J]. Highway, 2015, 60(6): 263-267.
- [6] 叶飞,何川,夏永旭.公路隧道衬砌裂缝的跟踪监测与分析研究[J].土木工程学报,2010,43(7):97-104.
YE Fei, HE Chuan, XIA Yong-xu. Post-construction monitoring and analysis for highway tunnel lining cracks[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7): 97-104.
- [7] 商涛平,童寿兴.混凝土裂缝深度的超声波检测方法研究[J].无损检测,2002,24(1):6-8.
SHANG Tao-ping, TONG Shou-xing. Study on ultrasonic testing of the depth of the cracks in concretes[J]. NDT, 2002, 24(1): 6-8.
- [8] 韦武举,逢焕平,李宣霖.超声平测法检测钢筋混凝土结构裂缝深度[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2007,30(4):475-477.
WEI Wu-ju, PANG Huan-ping, LI Xuan-lin. Determination of crack depth in reinforced-concrete structure by the ultrasonic testing method[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2007, 30(4): 475-477.
- [9] 刘恩军,冯强,余海忠.地铁隧道衬砌病害探地雷达图像特征分析[J].现代城市轨道交通,2022(4):41-45.
LIU En-jun, FENG Qiang, YU Hai-zhong. GPR image characteristics analysis of metro tunnel lining defects[J]. Modern Urban Transit, 2022(4): 41-45.
- [10] 董茂干,吴姗姗,黄宁,等.探地雷达在南京地铁隧道工程检测中的应用[J].物探与化探,2014,38(5):1090-1094.
DONG Mao-gan, WU Shan-shan, HUANG Ning, et al. The application of ground penetrating radar to subway tunnel engineering testing in Nanjing[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(5): 1090-1094.